

Kaynak Yapımında Kullanılan Robotik Kolun Maliyetinin Azaltılması İçin Bir Öneri

Farshid KHOSRAVI^a, Ebucihat AKTAŞ^a, Evren CANTÜRK^a, Mehmet AKYEMİŞ^a

^aBartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye.

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 24.03.2021
Kabul: 24.04.2021

Anahtar Kelimeler:
Kaynak robotu, robot
kol, elektrot kaynağı

ÖZ

Bu çalışmada kaynak yapımı için tasarlanmış bir robotik kolun maliyetinin azaltılması için bir öneri sunulmuştur. Son yıllarda endüstrinin hedefi hem işgücünün artırılması hem de maliyetin azaltılmasıdır. Bu çalışmada robotik kolların uzuvlarının hafifletilmesi ve daha hassas hareket mekanizmasının oluşturulması amaçlanmıştır. Bunun için, Ansys Workbench programı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiş ve robotik kolun uzuvları olan sigma profilleri için Al6063 0 ve Al6063 T-5 malzemelerinin bir karşılaştırması yapılmıştır. İlk olarak malzemelerin sınır koşulları belirlenip her parça için statik analiz gerçekleştirilmiş olup çıkan veriler karşılaştırılmıştır. Robotik kolların uzuvları için kullanılacak malzeme olarak sigma profil (Alüminyum 6063) tercih edilmiştir. Sigma profilin korozyona karşı dirençli olmasından dolayı boyama işlemine gerek duyulmamaktadır.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.01.08>

A Recommendation for Reducing the Cost of the Robotic Arm Used in Welding

ARTICLE INFO

Received: 24.03.2021
Accepted: 24.04.2021

Keywords:
Welding robot, robot
arm, electrode welding

ABSTRACT

In this study, reducing the cost of a robotic arm designed for welding is discussed and its application is shown. The goals of the industries in recent years are both increasing the labour and reducing the cost. The aim of this study is to lighten the limbs of the robotic arms and a more sensitive movement mechanism. According to this aim, an analysis was performed using the Ansys Workbench program and a comparison of Al6063 0 and Al6063 T-5 materials for sigma profiles, which are the limbs of the robotic arm, was made. Firstly, the boundary conditions of the materials were determined and a static analysis was performed for each part, and the obtained results were compared. Here, Sigma profile (Aluminum 6063) was preferred as the material to be used for the limbs of the robotic arms. Since the Sigma profile is also resistant to corrosion, painting is not required.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.01.08>

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Yaşadığımız dönemde çalışma verimliliğini arttırmak ve kaliteli parça üretmek sanayinin amaçlarındandır. Bu çalışmaların daha hızlı, daha kaliteli ve minimum düzeyde hatayla yapılabilmesi

için otomasyon sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemlerin en yaygın kullanılabildiği ise robotik koldur.

Literatürde robotik kollar ile ilgili bir dizi çalışma yapılmıştır. Bunlar aşağıda kısaca sıralanmıştır. Isık ve Çetin [1] bir robotik kolun doğal afet durumunda hastalara ilaç ve yiyecek yardımında bulunma gibi

*Sorumlu yazar: fmaleki@bartin.edu.tr

To cite this article: F. Khosravi, E. Aktaş, E. Cantürk and M. Akyemiş, "A Recommendation for Reducing the Cost of the Robotic Arm Used in Welding", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.1, pp. 67-80, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.01.08

hizmetlerde kullanımını amaçlamışlardır. Çalışmada mikro denetleyiciler kullanılarak düşük maliyetli otonom mobil tasarlanmışlardır. Mikro denetleyici olarak Arduino ve Raspberry kartları tercih edilmiştir. Raspberry kartı ve Pi kamera yardımıyla aktiviteler başka bir bilgisayara aktarılmıştır. Otonom hareket edebilmesi için GPS kullanılmıştır

Rüstemli vd. [2] kullanım alanları çoğaldığı için, iki eksenli robot kol tasarlanmışlardır. Tasarımda step motorları ve motor sürücü devreleri kullanılmıştır. Ayrıca kolay programlanabilme özelliğinden dolayı paralel port üzerinden kontrol sağlanmıştır. Çalışma bölgesinde uygun olmayan moment değerlerinde adım atlama hatası alınabileceği fakat uygun yüklerde herhangi bir pozisyon kaybı olmayacağı belirtilmiştir. Kolun en az 3 eksenli olmasının da çalışma alanı açısından faydalı olacağı da çalışmada belirtilmiştir.

Bozdemir ve Adıgüzel [3] robot kollarının insan gücü yerine kullanılmasının yaygınlaşması üzerine, PUMO tipi robot kol ile insan kol hareketlerini karşılaştırıp, yeni bir robot kol üzerinde omuz tasarlanmışlardır. Çalışmada önce insan omzunun anatomik yapısı incelenmiş ve omuzun küresel mafsallı yapısında ve üç eksen de hareket kabiliyetine sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışmada robot kol insan kol hareketlerini yapabilecek şekilde karmaşık yapıya sahip mafsallarla desteklenmiştir.

Yavuz ve Hocaoglu [4] Robot kolun uç nokta konumu üzerine yaptıkları çalışmada ileri kinematik analizlerinin trigonometrik fonksiyonlar ile büyük mertebeli matrislerle yapılabileceğini ifade etmişlerdir. Çalışma sonunda, yapay sinir ağlarının robot kolların kinematik analizinde güçlü bir alternatif olabileceğini ve hızlı sonuçlar alınabileceği ifade edilmiştir.

Tonbul ve Sarıtaş [5] Edubot adını verdikleri robotun uç noktasının gideceği konumun koordinatlarını (x, y, z) ve başlangıç durumundaki kol açısını girmek suretiyle, 4 farklı eklemden oluşan açıları $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$, ters kinematik problem olarak tanımlamışlar ve Matlab 5.02 yardımıyla çözmüşlerdir. Ayrıca hareketin düzgün ve titreşimsiz olabilmesi için yörünge planlaması yapmışlar, Bunu için konum, hız, ivme denklemlerinden yararlanmışlardır.

Kayışlı ve Uğur [6] üç serbestlik derecesine sahip bir robotun işlemcisine değişik yükler uygulayarak herhangi bir giriş sistem bozukluğu olup olmadığını araştırmışlardır. Bu yükleri test etmek için PID kontrol yöntemi ile bulanık mantık yöntemini tercih

etmişlerdir. Kontrol ortamında tasarım ve simülasyon gerçekleştirilmiş olup sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Ersin vd. [7] kol kasında güç kaybı yaşayan insanlar için, günlük işlerini kısmen yapabilecek şekilde alüminyum malzemeden giyilebilir robot kol tasarlanmışlardır. Eklemlere ve dirseklere servo motorlar monte etmişlerdir. Tasarım SolidWorks yazılımıyla yapılmış olup, kol, el ve omuz yükleri emniyet katsayısı dikkate alınarak 250N olarak dikkate alınmıştır. Bu hesaplar ışığında tork, güç hesapları yapılmış olup omuz, el ve kol için maksimum çalışma alanı belirlenmiştir.

Mühürücü [8] beş eklemlilik mafsallı robot kolunun ileri kinematik analizlerini yapmıştır. Bunu yaparken kolun başlangıç eklemleri ve hareket eklemleri açı girdileri yardımıyla robot elin erişim noktaları hesaplanmıştır. Hesaplamalarda her eklemler için 3x3 boyutlu matrisler tanımlanmıştır.

Coşkun ve Sümbül [9] uzaktan kumanda yardımıyla kontrol edilebilir bir robot tasarlanmışlardır. Kumanda sistemi için klavye tercih edilmiştir. Klavye bilgilerini yorumlamaya sahip mikro denetleyici LCD ye bağlıdır. Robot üzerinde birçok algılayıcı mevcuttur. Robot üzerinde bulunan bu algılayıcılar gelen verileri ana kart üzerinden okuyup yorumlamaktadır. Taşkaya vd. [10] doğrudan ulaşılamayan bölgelerden bilgi toplama ve müdahale görevini üstlenecek bir makine modellemişlerdir. Çalışmada robotik kola kamera ile görüş sağlanıp bilgisayar ile kontrol edilmesi amaçlanmıştır. Robotik kol kamera sayesinde bulunduğu ortamı görebilmekte ve bilgisayar sayesinde istediği hareketi yaptırabilmektedir. Buradaki hedef robotik kolun istenen her fonksiyona cevap verebilecek nitelikte olmasıdır.

Başka bir çalışmada Gezgin robot adı verilen bir yön veya konum boyunca otomatik olarak hareket edebilen serbest programlanabilir bir araç geliştirilmiştir [11]. Kullanıcının bilgisayar yardımı ile girdiği karmaşık komutlar temel hareket komutlarına dönüşmekte ve elektronik denetim kartlarına iletilmektedir. Bilgisayar ile mekanik sistem arasında arayüz işlevi gören elektronik denetim kartı bilgisayardan aldığı verileri mekanik sistem için gerekli elektriksel işaretlere dönüştürmektedir. Bu dönüştürme ile birlikte hareket organları komutlarını yerine getirmektedir.

Başka bir çalışmada ise eklemler sayısı azaltılmış bir robotik kolun Kinect 360 yardımı ile insan kolu

hareketlerini taklit edebilmesi sağlanmıştır [12]. Burada robotun çalışacağı ortam bir canlı üzerinde denenerek tasarlanmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada önceden tasarlanan robotik kollar kinect sensörü ile anlık kontrol edilebilmektedir.

Kinect'in algıladığı kol hareketleri, daha önceden tasarlanan matematiksel verilerin yazılıma aktarılmasıyla daha sonra da Arduino kart ile servo motorların sürme işlemi ile sağlanmaktadır. Burada Joystick ya da kumanda kollarına verilecek olan görevlerin önceden belirlenmiş olması gerekmektedir. Başka bir çalışmada 4 serbestlik dereceli bir robot kolu için bulanık yapay sinir ağı tabanlı hesaplanan tork kontrolü önerilmiştir [13]. Bu tür robotik kollar çoğunlukla endüstriyel uygulamalarda kullanıldığından bunların yüksek hareket ve hassasiyet kabiliyetine sahip olmaları istenir. Yüksek hızda çalışma ve robot kollarına uygulanan dış yükler robot kontrolünde önemlidir. Bu nedenle robotun verilen yörüngeleri en iyi şekilde takip edebilmesi için hesaplanan tork yöntemi geliştirilmiş ve bu yöntemin bulanık ağırlarıyla birleşimi, geri beslemeli kontrolün iyileştirilmesi sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar önerilen kontrol yönteminin başarılı olduğunu ispatlamıştır.

Genç [14] talaş kaldırma işleminde kullanılacak bir robotik kol modellemiştir. Çalışmada hedef çapağın ürün kalitesini düşürmesi tehlikesinin ve çevreye verdiği zararların bir robotik kol ile azaltılmaktadır. Diğer bir çalışmada iki uzuvlu eksenle hareket edebilen esnek bir robotik kolun matematiksel işlem şablonu tasarlanarak buna uygun deney ortamı hazırlanmıştır [15]. Model olarak Bernoulli-Euler giriş modeli kullanılmış olup Sanal uzuvlar, Pasif eklemler yöntemi ile tasarlanmıştır. Yazılımın denenebilmesi için bilgisayar ortamında örnek bir model oluşturularak, Yapay Sinir Ağları kullanılarak model çalıştırılmıştır. Bu yöntem ilk defa bu çalışmada uygulanmıştır.

Yüksel vd. [16] 2-DOF PID kontrolör ile 4 serbestlik dereceli robot kolu uç elemanı pozisyon kontrolü yapmışlardır. Robot kolun her bir uzvunun hareketi için DC motoru kullanılmış olup sistem Matlab/Simmechanics ortamında modellenmiştir. DC motorun transfer fonksiyonu elde edilerek robotik kol hem PID kontrolör hem de 2-DOF PID kontrolör ile kontrol edilmiştir. Kontrolörlerin parametreleri parçacık sürü optimizasyon (PSO) yöntemi ile optimize edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde 2-DOF

PID kontrolör performansının PID kontrolörün performansından daha iyi olduğu saptanmıştır.

Görel ve Altaş çalışmalarında [17] iki eksenli bir manipülatörün dairesel iş yörüngesi üzerindeki hareketini bulanık mantık denetim kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada yazılım algoritmasını oluşturmak için MATLAB/SIMULINK kullanılmıştır. Tasarlanan sistemin performansı PI denetleyicisinin performansı ile karşılaştırılarak BMD denetleyicinin uygunluğu irdelenmiştir. Burada motor olarak sürekli mıknatıslı DC Motor tercih edilmiştir.

Başka bir çalışmada dinamik bir esnek robot modelinin karmaşıklığı nedeniyle, basit bir kontrol cihazı tasarlanmıştır [18]. Ayrıca robotik kolun yüksek bir yük taşıma kapasitesine sahip olması gerektiğinden kontrol sisteminin sağlamlığı çok önemlidir. Kapalı döngü sisteminin kararlılığı Lyapunov teorisi dikkate alınarak gösterilmiştir.

Başka bir çalışmada ise kaynak, iz bölgesine tanımlanarak fuzzy kontrol algoritması yardımıyla tanımlanan bölge hesaplanmıştır. [19]. Koordinatlardaki değişimler bulanık mantık kontrol algoritması ile tahmin edilmiştir. Ani değişim durumunda, hata değişim miktarı bulanık mantık algoritması ile hesaplanarak hareket elemanlarına sinyal gönderilmiş ve bu durumda elemanların hızları değişmiştir.

Bu çalışmalarda kaynak robotlarındaki eksen sayısı artırılarak yeni bir yazılım oluşturulmuş ve genellikle malzeme olarak yapısal çelik, dökme demir vb. malzemeler tercih edilmiştir.

Bu çalışmada ise literatürde kullanılan malzemelerden farklı olarak Al6063 0 malzemesi kullanılmış ve böylece maliyetin azaltılması ve enerji tasarrufunun gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Robotik kol uzvunda malzeme olarak Al6063 0 seçilmiştir. Bu malzemenin tercih edilmesinin sebebi korozyona karşı dirençli olup boyanmasına gerek olmamasıdır. Ayrıca bu malzeme kolay montajlanabilme özelliğine sahiptir. Çalışmada karşılaştırma için Al6063 T-5 malzemesi seçilmiştir. Tablo 1'de Al6063 0 ve Al6063 T-5'in mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 1 Al-6063 0 ve Al-6063 T-5 mekanik özellikleri (Mechanical properties of Al-6063 0 and Al-6063 T-5) [20]

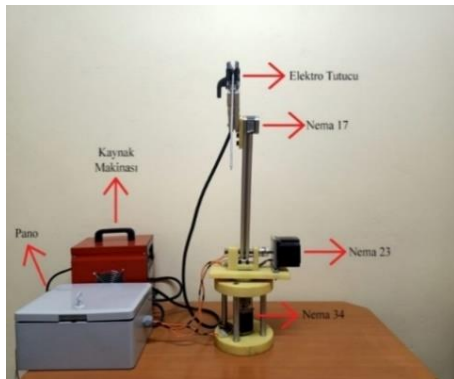
	Elastik Modülü (N/mm ²)	Poisson Oranı	Kütle Yoğunluğu (kg/mm ³)	Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Gerilme Mukavemeti (N/mm ²)
Al-6063 0	6900	0.33	25800	50	90
Al-6063 T-5	6900	0.33	2710	145	185

Robotik kol tasarlanırken ISO 8373 standartlarına uyulmuştur. (ISO 8373: Üç ve daha fazla kodlanabilir eksene sahip olan, otomatik kontrollü, çok kullanışlı manipulatördür [21].)

Robotik kol 3 eksenenden oluşmuştur. Tablo 2’de çalışmada kullanılan parçalar ve adetleri verilmiştir. Şekil 1’de kolun montaj hali ve Şekil 2’de ise kolun mafsıl açıları gösterilmiştir. Statik analiz, analizini yaptığımız parça üzerindeki yüklerin ve kısıtlamaların, lineer olarak tanımlanmış malzeme özellikleri ile oluşturduğu anlık çözümlerdir. Statik analiz sonuçları anlık sonuçlardır. Bu analize göre parçalarımıza gelen gerilmelerin dağılımı görülmektedir.

Tablo 2. Robotik kol tasarımında kullanılan parçalar (Parts used in the robotic arm design)

Kullanılan parçalar	Adet
Alt tabla	1
Robotik kolun y eksenine hareketini sağlayan mil	1
Üst tabla	1
Alt ve üst tablayı birleştiren mil	4
30x30 sigma profil 200 mm robotik kolun ilk uzvu	1
30x30 sigma profil 400 mm robotik kolun ikinci uzvu	1
Elektrot tutucu	1



Şekil 1. Robotik kolun montaj hali (Assembly of the robotic arm)



Şekil 2. Robotik kolun mafsıl ve açıları (Joints and angles of the robotic arm)

2.1. Mikro Denetleyici ve Yazılım (Micro Controller and Software)

Mikro denetleyici olarak robotik kolda Atmega328 kullanılmıştır. Mikro denetleyicinin görevi kısa olarak gelen bilgileri bilgisayardan alıp seri bilgiler halinde step motorlara iletmektir. Yazılımda ise Arduino yazılımı tercih edilmiştir. Bu yazılımın seçilmesinin temel sebebi mikro denetleyicisinin çalışma prensibine uygun bir kütüphanesinin olmasıdır. Ayrıca arduino çevresel modüller sayesinde devre kurmayı daha basit hale getirmektedir.

2.2. Step Motorlar (Stepper Motors)

Step motorlar (Şekil 3) elektrikten güç alarak dönme hareketi sağlayan, girişlerine pals sinyalleri uygulanarak dönme hareketi meydana getiren aygıtlardır. Step motorlar bu dönme hareketini adımlı bir biçimde ve kontrollü olarak yaparlar ve son derece hassastırlar.

Step motor, genellikle bir rotordan (kalıcı mıknatıs), stator sargılarından ve rulmanlardan oluşur. Rulmanlar, rotora bağlı şaftın hareketinin

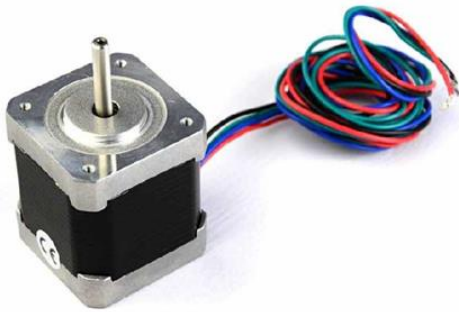
rahatlığını sağlarlar. Sargıları belirli bir sırayla adım adım harekete geçirip, içinden bir akım geçmesine izin verdiğimizde, statoru mıknatıslamak suretiyle elektromanyetik itmeler oluştururlar. Oluşan bu her elektromanyetik itmeye step denir ve bu da step motorların çalışma prensibini oluşturur.

Motorun dönme miktarı, bobinlere sırasıyla verilen pals sinyallerine bağlıdır. Step motorlarda motorun yapısına bağlı olarak dönme açısı değişkenlik gösterir. Genellikle 90° , 45° , 18° , 7.5° , 1.8° değerlerinde motorlar bulmak mümkündür. Daha küçük açı değerlerinde motorlar da olabilir. Bu ise maliyetleri arttıran bir durumdur. Açı değeri küçüldükçe motor maliyetleri artacağından bu açı değeri, tasarımlar yapılırken göz önüne alınması gereken önemli bir parametredir.

Step motorların hassas konumlandırılabilmesi mümkündür. Yine hassas olarak hız ayarlamaları yapılabilir. Düşük devirlerde bile yüksek döndürme etkisine (torka) sahip olmaları, avantajları olarak söylenebilir. Step motorlarda adım açısı ve adım sayısı şu şeklide hesaplanır. 360° dönen step motorlarda gerekli adım açısı (θ), faz sayısının (F) ve motordaki rotorun çıkıntılı kutup sayısı (K) olmak üzere;

$$\theta = \frac{360^\circ}{F.K} \quad (1)$$

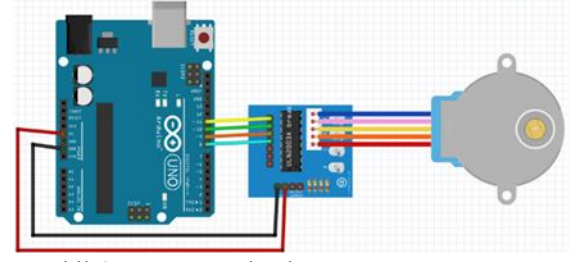
ile, adım sayısının (S) ise adım açısı (θ) olmak üzere, $S = \frac{360^\circ}{\theta}$ ile hesaplanır.



Şekil 3. Step motor (Stepper motors)

Bu çalışmada step motorlar, konumlandırmada ve hız kontrolünde kolaylık sağladıklarından ve yüksek tork elde edilebildiğinden tercih edilmişlerdir. Şekil 4'te örnek bağlantı şemasında, arduino, motor sürücü ve step motor bağlantısı gösterilmiştir. Çalışmamızda 1 adet Arduino uno ile

3 adet step motor ve her bir motor için 1 adet olmak üzere toplam 3 adet motor sürücü planlanmıştır. Tabla kısmında (1 adet), üst tabla ile 1. uzun bağlantısında (1 adet), 1. ve 2. uzuvların bağlantısında (1 adet) olacak şekilde 3 step motor kullanılmıştır. Yine, değerleri 8.5A-24V ve 10.5A-24V olmak üzere 2 adet güç adaptörü de planlanmıştır. Güç adaptörlerinin biri (8.5A-24V) Nema 34 motor için, diğeri (10.5A-24V) Nema 17 ve Nema 23 step motorlar için tasarlanmıştır.



Şekil 4. Step motor bağlantı şeması (Stepper motor connection diagram)

Kullanılan Motorlar, motor sürücüleri ve adaptörlerin özellikleri, NEMA 34 Step Motor 4.5 Nm 86Hs45 (1.8° adım açılı, 200 adımlı), Nema 23 Step motor 2.2 Nm 57Hs22 (1.8° adım açılı, 200 adımlı), Nema 17 Step Motor 0.47 Nm (1.8° adım açılı, 200 adımlı), 3 adet M542 (Cwd556) Step Motor Sürücüsü Nema 34 ve güç adaptörleri 10.5A-24V ve 8.5A-24V şeklindedir.

2.3. Sonlu Elemanlar Analizi (Finite Element Analysis)

Bu çalışmada robotik kolların uzuvlarının hafifletilmesi ve daha hassas bir hareket mekanizması geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bunun için, Ansys Workbench programı kullanılarak statik analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada robotik kolun uzuvları için sigma profilleri Al6063 0 ve Al6063 T-5 malzemelerinin kullanılması durumları için bir karşılaştırma yapılmıştır.

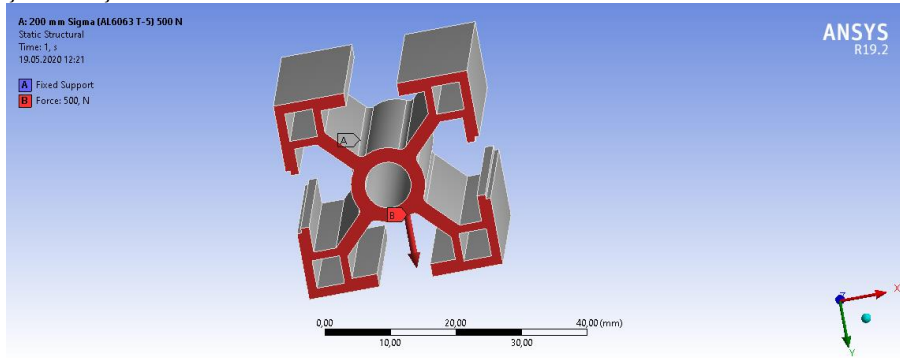
3. BULGULAR (RESULTS)

3.1 200 mm Sigma Profilin Statik Analizi (Static Analysis of 200 mm Sigma Profile)

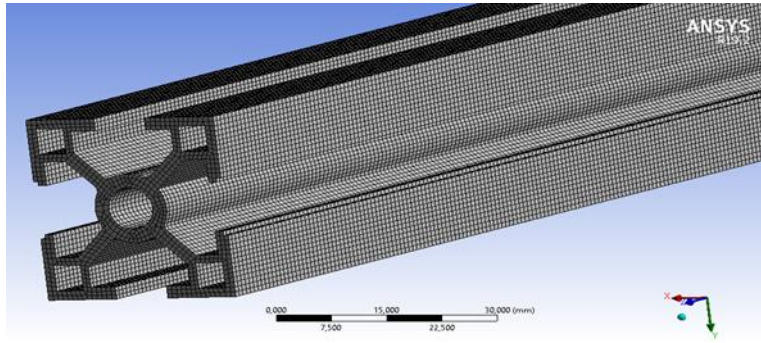
Parçamız Şekil 5'de görüldüğü üzere alt tablo ile montaj olacağı bölgeye sabitlenmiştir. Step motor ağırlığı ve 400 mm sigma profil ağırlıkları toplamı 20kg'dır. Emniyet katsayısını 2.5 olarak uygulanan kuvvet 500 N olmaktadır. Şekil 5'teki gibi her iki taraftan compenent şeklinde uygulanan kuvvet Y

ekseninde, -500N değerinde uygulanmıştır. Alt tablo ile montajı olacağı bölge sabitlenmiştir.

Malzeme özellikleri için Tablo 1'den yararlanılmıştır. Mesh kalitesi olarak Local Mesh uygulanmıştır ve multizone mesh tercih edilmiştir (Şekil 6). Mesh elemanları ise dörtgen ve piramit şeklinde tercih edilmiştir. Parçamızda çok fazla keskin köşeler bulunduğu için bu keskin köşelerde dörtlü mesh yetersiz kalmıştır. Bu nedenle dörtlü ve piramit mesh kullanılmıştır. Ayrıca 123200 tane mesh elemanı çıkarılmıştır.



Şekil 5. 200 mm sigma profilin sabitlenme noktası ve kuvvet uygulanma noktaları (Fixing point and force application points of 200 mm Sigma profile)



Şekil 6. 200 mm sigma profilin Mesh görüntüsü (Mesh of 200 mm Sigma profile)

Robotik kolumuzun ilk uzvuna baktığımızda Şekil 8'de gördüğümüz gibi Al6063 T-5 ve Al 6063 0 sigma profillerde 0.75 mm maksimum yer değiştirme görülmüştür.

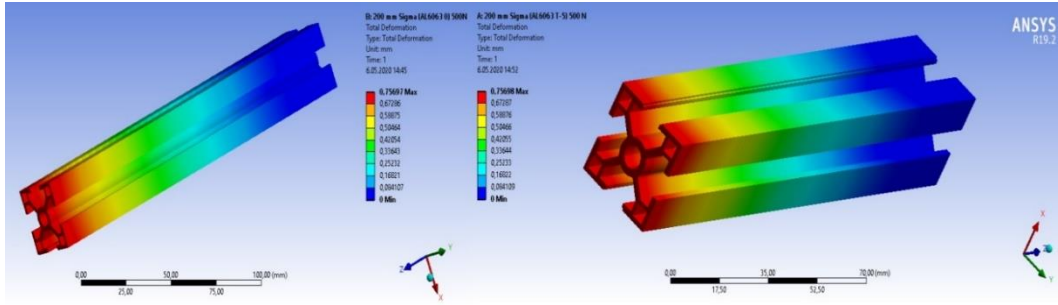
Mesh Metric	Skewness
Min	2,5675e-003
Max	0,55634
Average	0,19126
Standard Deviation	0,10326

Şekil 7. 200 mm sigma profilin Skewness değeri (Skewness Value of 200 mm Sigma profile)

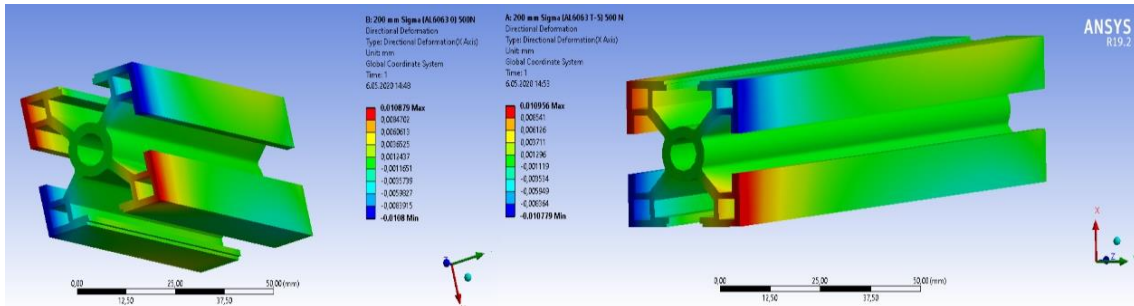
$$Skewness = \frac{Optimum\ Eleman\ Boyutu - Aktif\ Eleman\ Boyutu}{Optimum\ Eleman\ Boyutu} \quad (2)$$

Mesh kalitemizin ne kadar iyi olduğunu görebilmek için skewness değerine bakılmıştır kullanılan modelde skewness değeri 0.55 olarak bulunmuştur (Şekil 7). Skewness değeri Denklem 2'den hesaplanmaktadır.

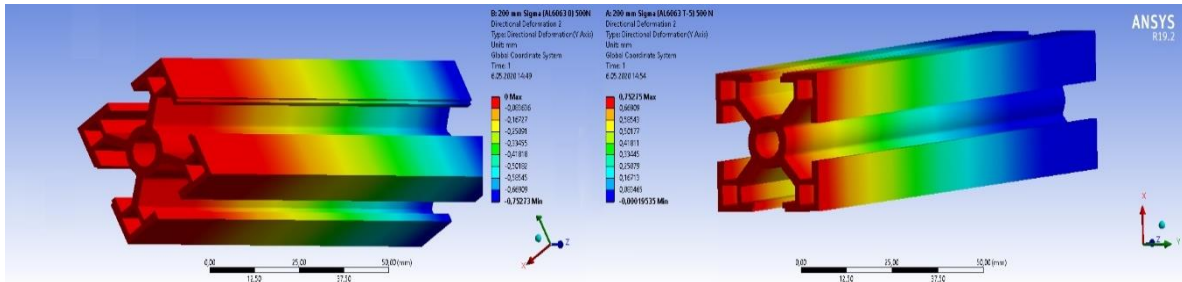
Aynı zamanda X ve Y eksenlerinde görüldüğü üzere Al6063 T-5 malzemesi ile Al6063 0 malzemesi aynı oranda deformasyon yapmıştır. Şekil 9'dan X eksenindeki maksimum deformasyonun 0.010879 mm olduğu, buna karşın Şekil 10'dan Y ekseninde maksimum deformasyonun Al6063-0'da sıfır ve Al6063 T-5'de 0.752275mm olduğu görülmektedir.



Şekil 8. 200 mm sigma profillerin total deformasyonları (Total deformation of 200 mm Sigma profiles)



Şekil 9. 200 mm sigma profilin X ekseninde toplam deformasyonları (Total deformation of 200 mm sigma profile in X)



Şekil 10. 200 mm sigma profilin Y ekseninde toplam deformasyonları (Total deformation of 200 mm sigma profile in Y)

Robotik kolun uzvundaki gerilmelere bakıldığında ise sigma profilinin her iki noktada da tam bağlantı noktasındaki radius kısmının alt tarafında maksimum gerilmenin meydana geldiği görülmektedir. Gerilmele bakıldığında Şekil 11'de görüldüğü üzere AL6063-0 ve AL6063-T5 sigma profillerin maksimum gerilmelerinin 62Mpa olduğu görülmektedir.

Tablo 3. 200 mm sigma profillerin yatak kuvvetleri (Reaction forces of 200mm sigma profiles)

	X	Y	Z
AL 6063 0	0	-500 N	0
AL6063 T-5	0	-500 N	0

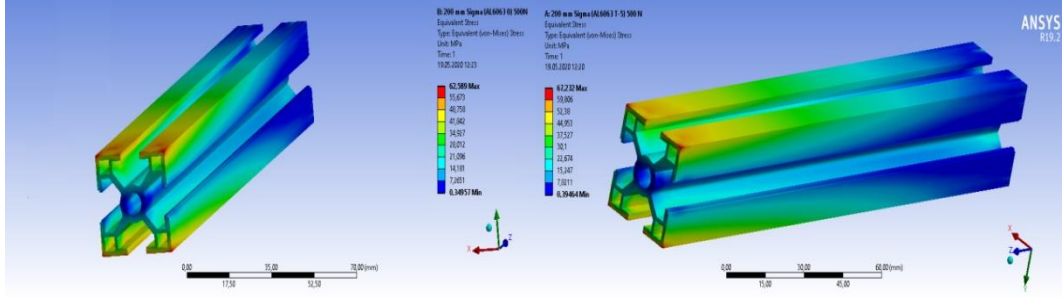
200 mm sigma profilinin sabitlendiği bölgedeki yatak kuvveti sonuçları Tablo 3'de görülmektedir.

Sonuçlara bakıldığı zaman toplam kuvvetin aynı olduğu görülmektedir. Şekil 12'ye baktığımızda ise yatak kuvvetlerinin aynı yönde olduğu görülmektedir.

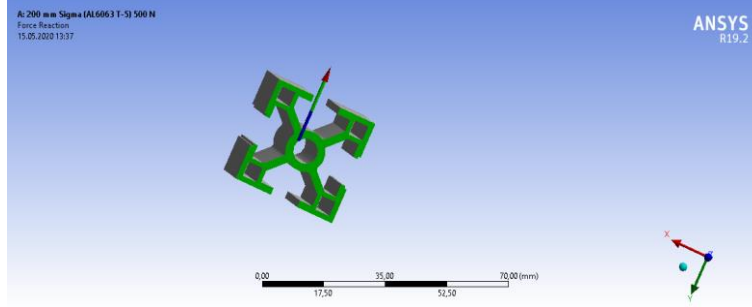
Sigma profilin sabitlendiği bölgede elde edilen momentlerin sonuçları Tablo 4'de verilmiştir. Elde sonuçlardan toplam momentin aynı olduğu görülmektedir. Şekil 13'te ise momentlerin yönü görülmektedir.

Tablo 4. 200 mm sigma profillerin yatak momentleri (Reaction moments of 200 mm sigma profiles)

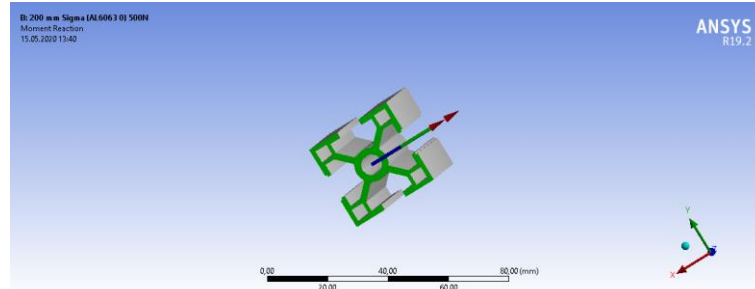
	X	Y	Z
AL 6063 0	0	0	-0.4303 N.mm
AL6063 T-5	0	0	-0.40363 N.mm



Şekil 11. 200 mm sigma profilin Von-Mises gerilmeleri



Şekil 12. 200 mm sigma Al6063 0 ve Al6063-T5'in yatak kuvvetlerinin yönü (Direction of reaction forces of 200 mm sigma Al6063 0 and Al6063-T5)



Şekil 13. 200 mm sigma Al6063 0 ve 6063-T5'in momentlerinin yönü (Direction of moments of 200 mm sigma Al6063 0 and 6063-T5)

3.2 400 mm Sigma Profilin Statik Analizi (Static Analysis of 400 mm Sigma Profile)

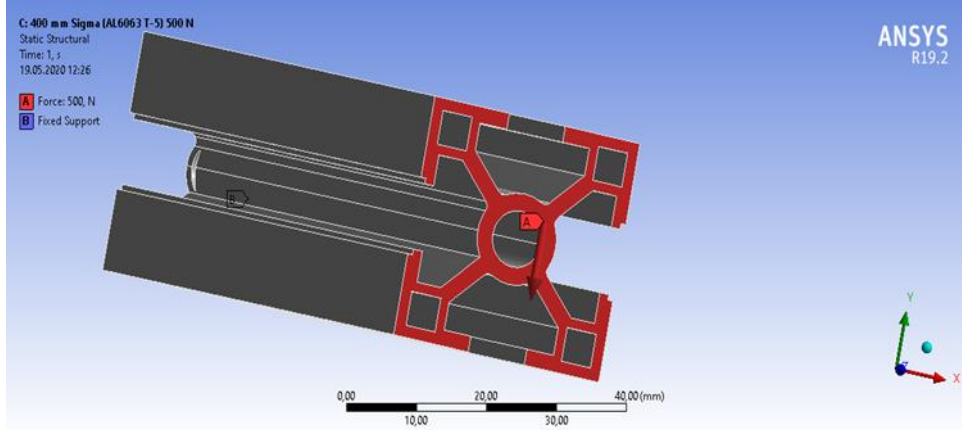
400 mm uzunluğundaki sigma profilin analizinde kullanılan malzeme aynıdır. Tablo 1'de malzeme özellikleri verilmiştir. Şekil 14'deki gibi iki sigma profilin bağlanacağı yerden sabitlenmiş ve Şekil 8'deki gibi her iki taraftan component şeklinde uygulanan kuvvet Y ekseninde -500 N değerinde uygulanmıştır.

İlk parçamızda da olduğu gibi Mesh kalitesi olarak Local Mesh uygulanmış ve multizone mesh tercih edilmiştir. Parçamızda aynı zamanda step motorların bağlantı bölgelerinde olduğundan Tetra mesh kullanılmamaktadır. Bu nedenle Altigen ve Piramit mesh kullanılmıştır (Şekil 15). Ayrıca bu parça daha uzun olduğundan keskin elemanlardaki

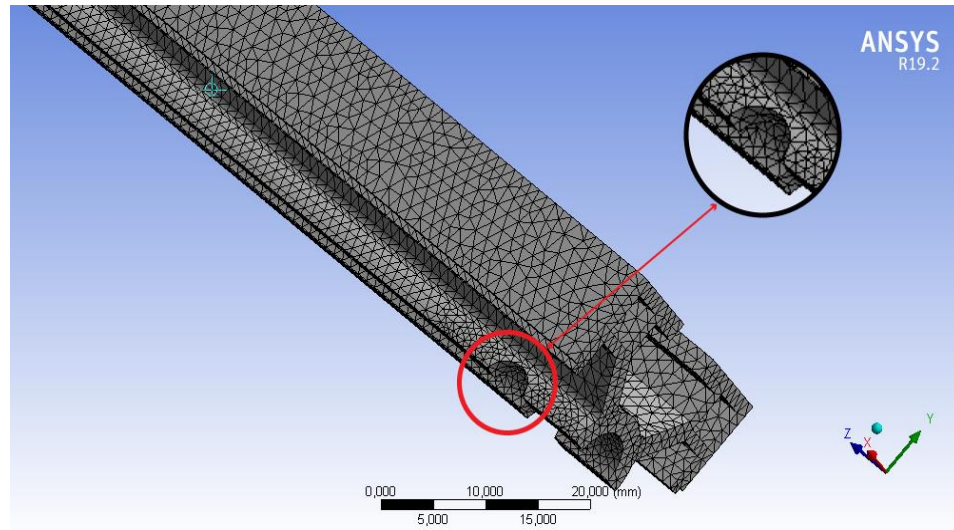
mesh geçişini küçültmek ve Skewness değerinin azaltılması için Transition seçeneğinden Slow yapılmıştır. Böylelikle 2 eleman arasındaki geçiş detaylandırılmıştır. Bu bölgede 455086 tane mesh kullanılmıştır.

Robotik kolun ikinci uzvuna bakıldığında bir önceki parçalara kıyasla yer değiştirmenin arttığı ve maksimum deformasyonların birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Şekil 16'dan maksimum deformasyonun Al6063-0 ve Al6063-T5 için 5.72 mm olduğunu görülmektedir.

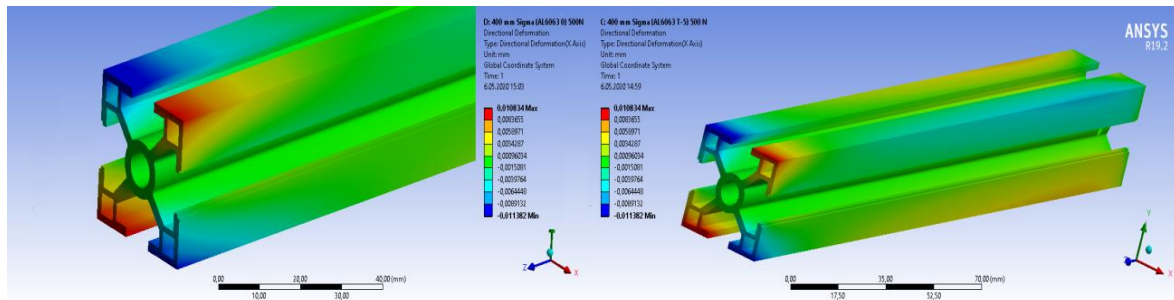
Sigma profilin X ve Y eksenlerinde görüldüğü üzere birbirlerine yakın deformasyon yaptıkları görülmektedir. Şekil 17 ve Şekil 18'de sırasıyla X ve Y eksenlerindeki maksimum deformasyonlar görülmektedir. Bu değerler Tablo 5'te de verilmiştir.



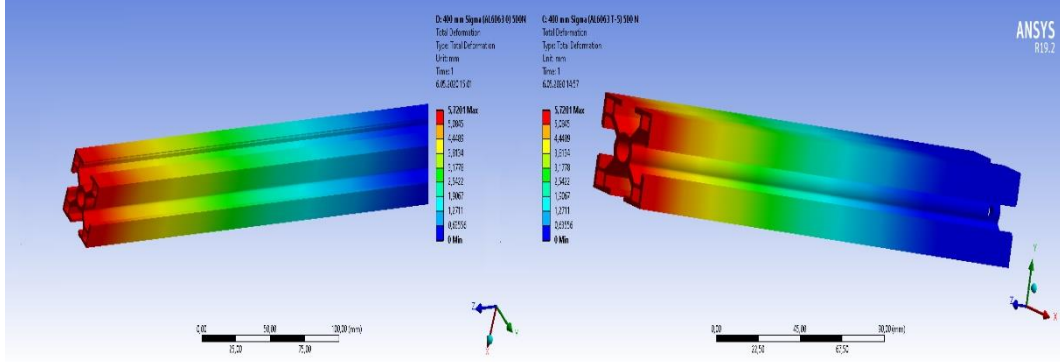
Şekil 14. 400 mm sigma profilin sabitleme noktası ve kuvvet uygulanma noktaları (Fixing point and force application points of 400 mm Sigma profile)



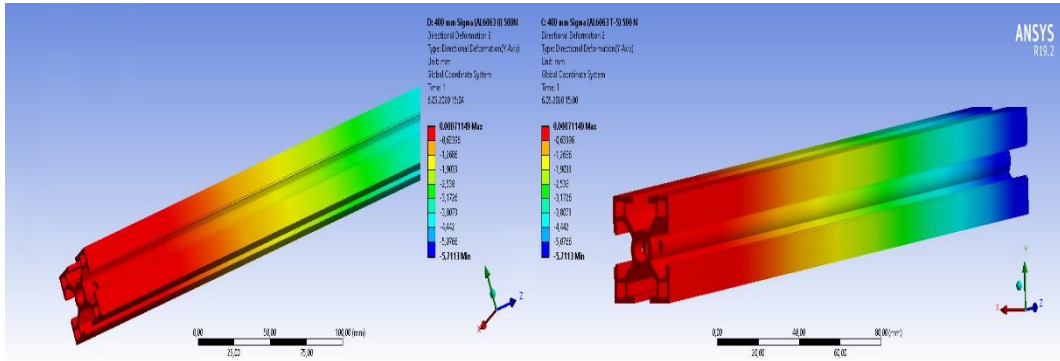
Şekil 15. 400 mm sigma profilin Mesh yapısı (Mesh of 400 mm Sigma profile)



Şekil 16. 400 mm sigma profillerin total deformasyonları (Total deformations of 400 mm sigma profiles)



Şekil 17. 400 mm sigma profillerin X eksenindeki total deformasyonları (Total deformations of 400 mm sigma profiles in X-axis)



Şekil 18. 400 mm sigma profillerin Y eksenindeki total deformasyonları (Total deformations of 400 mm sigma profiles in Y axis)

Tablo 5. 400 mm sigma profillerin X ve Y eksenlerinde maksimum deformasyonlar (Maximum deformations of 400 mm sigma profiles in X-axis and Y-axis)

Toplam maksimum deformasyon	X	Y
AL 6063 0	0.010834 mm	0
AL6063 T-5	0.010834 mm	0

Burada maksimum gerilmelere bakıldığında Al 6063 0'da Şekil 19'da görüldüğü üzere 200 Mpa gerilmesine oluştuğu, Al6063 T-5 malzemesinin maksimum gerilmesinin de bundan farklı olmadığı görülmektedir.

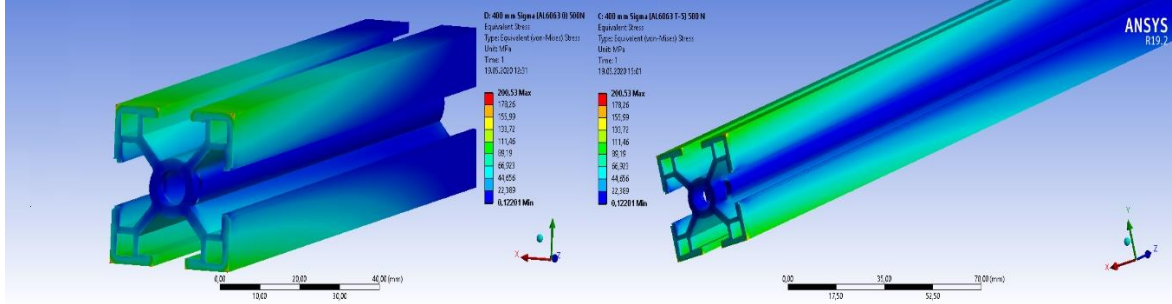
400mm sigma profilinin sabitlendiği bölgedeki yatak kuvvetleri Tablo 6'da verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında toplam kuvvetin aynı olduğu

görülmektedir. Şekil 20'de ise yatak kuvvetlerinin yönü görülmektedir.

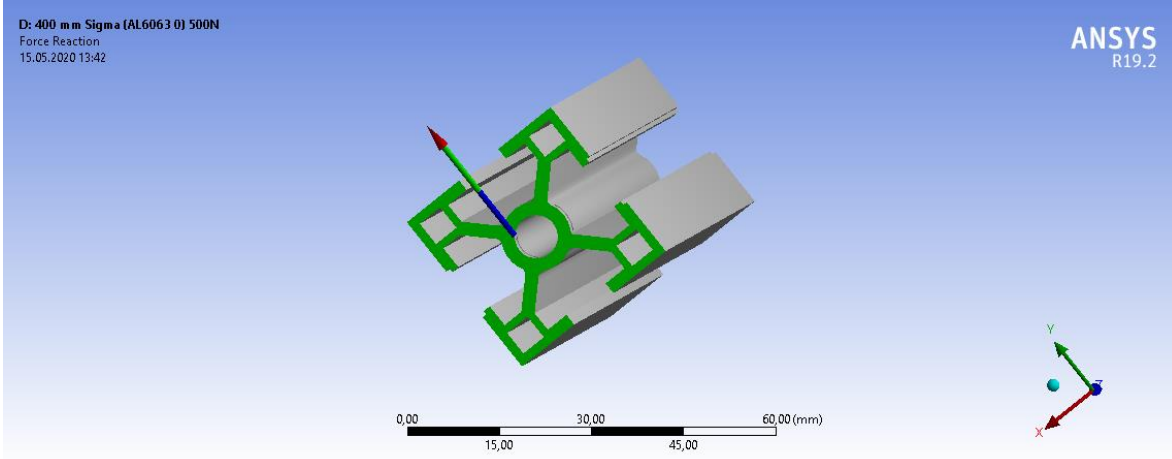
Tablo 6. 400mm sigma profillerin yatak kuvvetleri (Reaction forces of 400mm sigma profiles)

	X	Y	Z
AL 6063 0	0	500 N	0
AL6063 T-5	0	500 N	0

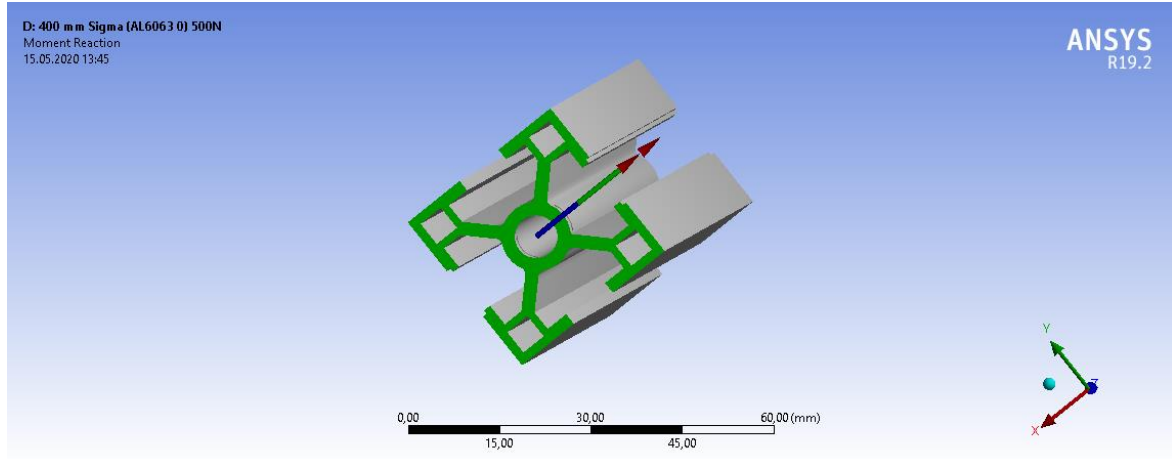
Sigma profilin sabitlendiği bölgedeki momentlerin sonuçları Tablo 7'de görülmektedir. Burada da total momentlerin aynı olduğu görülmektedir. Şekil 21'de ise momentlerin yönü görülmektedir.



Şekil 19. 400 mm sigma profillerin Von-Mises gerilmeleri (*Von-Mises stresses of 400 mm sigma profiles*)



Şekil 20. 400 mm sigma Al6063 0 ve Al6063-T'in yatak kuvvetleri (*Reaction forces of 400 mm sigma Al6063 0 and Al6063-T*)



Şekil 21. 400 mm sigma Al6063 0 ve Al6063-T 5'in momentlerinin yönü (*Direction of moments of 400 mm sigma Al6063 0 and Al6063-T 5*)

Tablo 7. 400 mm sigma profillerin yatak momentleri (*Reaction moments of 400 mm sigma profiles*)

	X	Y	Z
AL 6063 0	0	0	0.38308 N.mm
AL6063 T-5	0	0	0.38308 N.mm

3.3 200 mm Sigma Profilin Burkulma Analizi (*Buckling Analysis of the 200 mm Sigma Profile*)

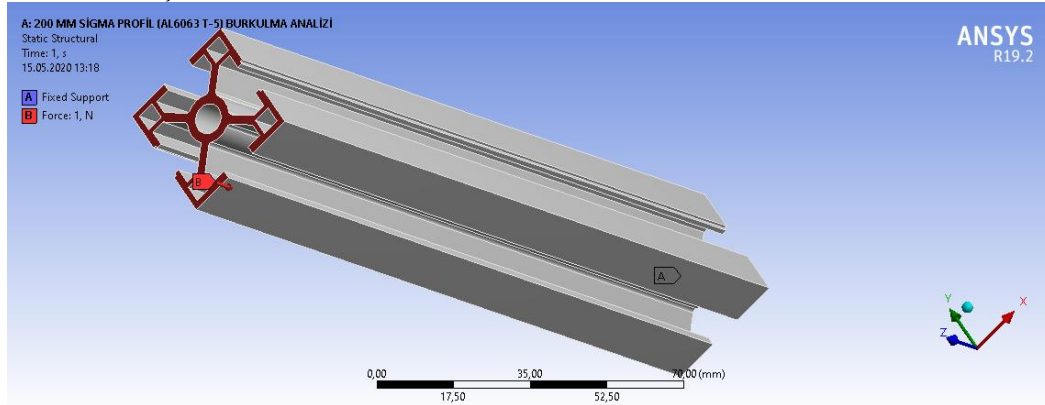
Bir malzemenin ani bir şekilde hasar görmesinin iki sebebi vardır. Bunlar, malzeme hasarı ve burkulma (yapısal kararsızlık) dır. Burkulmanın meydana geldiği yük, yapının dayanımına değil

rijitliğine (stiffness) bağlıdır. Ele alınan örnek görüldüğü üzere sabitlenmiş olup Z ekseninden 1 N yüke maruz bırakılmıştır. Bunun sonucunda her bir malzemenin 4 mod için kritik yükleri elde edilmiştir (Şekil 23). Meshleme Şekil 6'da görüldüğü üzere bir önceki statik yüklemde kullanılan meshleme ile aynı olarak yapılmıştır. Tablo 8'de her bir mod için maksimum kuvvetler görülmektedir. Denklem 3'den yararlanılarak analitik olarak kritik burkulma yükleri bulunmuş ve sonlu elemanlar yöntemi ile bulunan sonuçlarla Tablo 8'de karşılaştırılmıştır. Her iki malzeme için Elastisite modülü (E) 69 GPa, atalet momenti (I) $2.91 \times 10^4 \text{ mm}^4$ ve çubuğun boyu (L_k) 200 mm olarak alınmıştır.

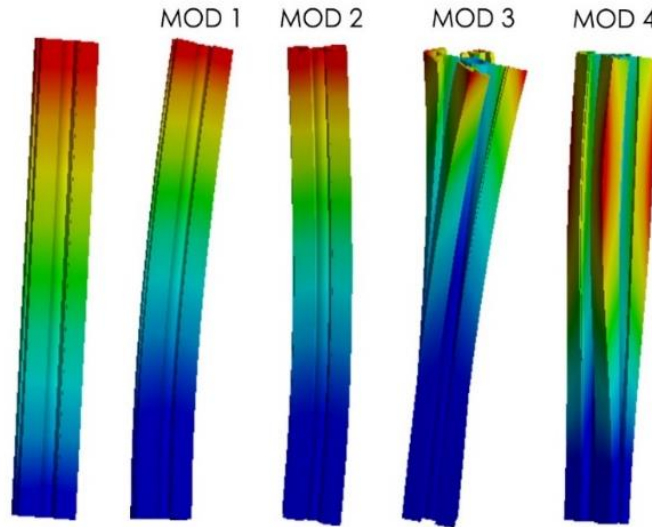
$$P_{kr} = \frac{\pi^2 EI}{L_k^2} \quad (3)$$

3.4 400 mm Sigma Profilin Burkulma Analizi (Buckling Analysis of the 400 mm Sigma Profile)

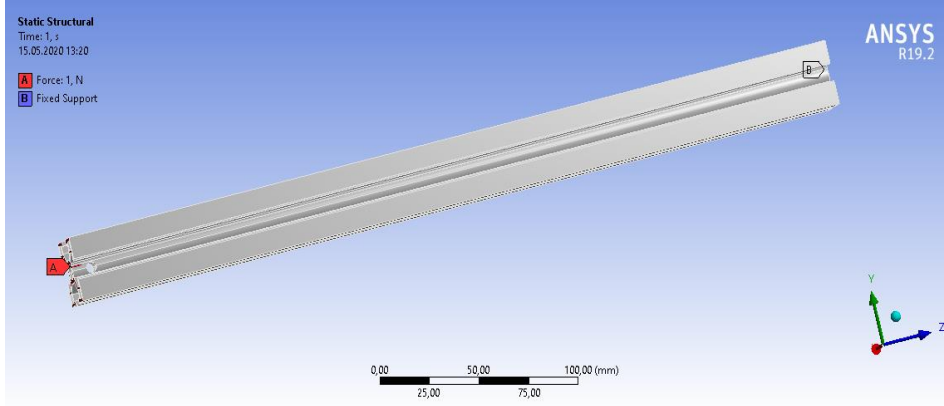
Ele alınan parça şekil 24'de görüldüğü üzere sabitlenmiş olup Z ekseninden 1 N yüke maruz bırakılmıştır. Bunun sonucunda her bir malzemede 4 mod için kritik burkulma yükleri elde edilmiştir. 400 mm sigma profilleri içinde analitik çözüm yapılmıştır. Analitik ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen kritik yükler Tablo 9'da karşılaştırılmıştır.



Şekil 22. 200 mm sigma Al6063 0 ve Al6063-T5'in sabitlenme noktası ve kuvvet uygulanma noktaları (Fixing point and force application points of 200 mm sigma Al6063 0 and Al6063-T5)



Şekil 23. 200 mm sigma Al6063-0 ve T-5'in burkulma modları (Buckling modes of 200 mm sigma Al6063-0 and T-5)



Şekil 24. 400 mm sigma profilin sabitlenme noktası ve kuvvet uygulanma noktaları (Fixing point and force application points of 400 mm Sigma profile)

Tablo 8. 200 mm Sigma profillerin kritik kuvvetleri (Critical loads of 200 mm Sigma profiles)

	Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4
Al6063-0/Ansys	109530 N	111100 N	411430 N	570087 N
Al6063-0 ve T5/Analitik Çözüm	115345 N	226075 N	346034 N	461379 N
Al6063-T5/Ansys	108340 N	109910 N	406220 N	564240 N

Tablo 9. 400 mm Sigma profillerin kritik kuvvetleri (Critical loads of 400 mm Sigma profiles)

	Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4
Al6063-0/Ansys	28493 N	28593 N	232850 N	236410 N
Al6063-0 ve T5/Analitik Çözüm	28906 N	56519 N	86719 N	115625 N
Al6063-T5/Ansys	28515N	28916 N	232760 N	235780 N

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada robotik kolun uzunluklarını hafifletmek için bir malzeme önerilmiştir. Çalışmada önerilen malzeme davranışı için oluşturulan sonlu elemanlar modeli uygun bir mesh yapısı ile oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar analiz sonuçlarından Al 6063-0 ile Al6063 T-5 deformasyon ve gerilmelerinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Çalışma kapsamında ayrıca Burkulma analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerden önerilen malzemenin burkulmaya karşı emniyetli olduğu gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlardan Al6063-0 kullanılması durumunda robotik kolun uzunluklarının ağırlığının azaldığı ve dolayısıyla maliyet açısından 'da önemli bir tasarruf sağlandığı görülmektedir. Çalışmada sigma profil kullanılması durumunda bu profilin korozyona karşı dirençli olması nedeniyle kaplama veya boyamaya gerek kalmamakta böylece buda maliyeti düşürmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından desteklenmiştir. Kuruma desteklerinden ötürü teşekkür ederiz.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Isık and Ö. Çetin, "Multifunctional and Low Cost Autonomous Mobile Robot," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)*, vol. 6, no. 2, pp. 105-110, August, 2020.
doi: <https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2020.02.02>
- [2] Rüstemli M. Yılmaz and N. İnanç, "İki Eksenli Robot Kolun Paralelport Üzerinden Kontrolü,"

Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, vol. 14, no. 1, pp. 45-49, 2009.

[3] M. Bozdemir and E. Adıgüzel, "Puma Tipi Robot ile İnsan Kolu Hareketlerinin Karşılaştırılması; Alternatif Bir Robot Kol Omuz Tasarımı," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 5, no. 2, pp. 1057-1061, 2011.

[4] Ş. Yavuz and M. Hocaoglu, "İki Serbestlik Dereceli Robot Kollarında Uç Nokta Konumunun Yapay Sinir Ağları ile Bulunması," in *Proc. of the Trc-IFTtoMM Symposium on Theory of Machines and Mechanisms, İzmir*, June 14-17 2015.

[5] T. Tonbul and M. Sarıtaş, "Beş Eksenli Bir Edubot Robot Kolunda Ters Kinematik Hesaplamalar Ve Yörünge Planlaması," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 18, no. 1, pp. 0, April 2013.

[6] K. Kayışlı and M. Uğur, "Fuzzy Logic and PID control of a 3 DOF Robotic Arm," *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, vol. 5, no. 4, pp. 223-233, December 2017, doi: 10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.339907

[7] Ç. Ersin, M. Yaz and H. Gökçe, "Upper Limb Robot Arm System Design and Kinematic Analysis," *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 1320-1331, 2020, doi: 10.31202/ecjse.753267

[8] A. Mühürücü, "Solution of Forward Kinematic for Five Axis Robot Arm using ANN," *Electronic Letters on Science and Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 55-59, August 2005.

[9] H. Sümbül and A. Coşkun, "Mayın Tarama ve Bomba İmha Sistemlerinin Tek Robot Üzerinde Modernizasyonu," *Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri, Akademik Bilişim'11-XIII.*, İnönü Üniversitesi, Malatya, Turkey, February, 2011, pp. 37-42.

[10] H. O. Taşkaya, D. Özgür and L. Özyılmaz, "Bilgisayar Kontrollü Kameralı Robot Kolu Tasarımı," *Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı, Bursa, Turkey*, December, 2006, pp. 219-219.

[11] S. Özen, E. Yıldız and T. Uzun, "Bilgisayar Kontrollü Gezgin Robot Uygulaması," in *Proc. of the*

2000 1st Int. Conf. on ELECO' 2000, Bursa, Turkey, November, 2000, pp. 323-327.

[12] M. E. Şenli, R. Özcan, and U. Diyarbakır, "Kinect Kontrollü Robot Kol," *Erzurum Teknik Üniversitesi Öğrenci Dergisi*, May 2018.

[13] Ş. Arslan and M. Korkmaz, "Bulanık Yapay Sinir Ağıyla Dört Serbestlik Dereceli Bir Robot Kolunun Kontrolü," *Sakarya University Journal of Science*, vol. 17, no. 1, pp. 131-138, 2013.

[14] Y. H. El Naser, D. Karayel, S. S. Ozkan, and G. Atali, "Talaşlı İmalatta Otomatik Çapak Alma İşlemi için Endüstriyel Robot Kol Tasarımı," in *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Baku, Azerbaijan, September, 2017, pp.1288-1298.

[15] E. Genç, "İki Uzunluklu Düzlemsel Esnek Robot Kol Tasarımı ve Kontrolü," Ph.D. Dissertation, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, 2015.

[16] G. Yüksel, T. Yiğit and H. Çelik, "DA Motor Tahrikli Dört Serbestlik Dereceli Bir Robot Kolun 2-DOF PID ile Kontrolü," *TOK2018 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Kayseri, Turkey, September*, 2018, pp. 22-26.

[17] G. Görel and H. Altaş, "Bulanık Mantık Kontrollü Çift Eklemlili Robot Kolu," *TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, Elâzığ, Turkey, October*, 2011, Fırat Üniversitesi, pp. 152-156.

[18] K. B. Park and J. J. Lee, "Design of a Simple and Robust Control System for a Single-Link Flexible Robot Arm," *IFAC Proceeding Volumes*, vol. 25, no. 20, pp. 181-186, September 1992.

[19] A. Öztürk, İ. Asiltürk, H. Düzcükoğlu and Ö. Aydoğdu, "Gaz altı Kaynak Uygulamalarında Bulanık Mantık Kontrollü İz Takip Sistemlerinin Uygulanması," *Mühendis ve Makine*, vol. 57, no. 674, pp. 57-64, 2016.

[20] A. Namalan, "Lightening of Robot Arms with Topology Optimization Method," in *The International Aluminium-Themed Engineering And Natural Sciences Conference, Konya, Turkey, October*, 2019.

[21] ISO 8373 1994 standard document, Manipulating industrial robots ~ Vocabulary (EN/ISO 8373 1996).